

于斌,孙媛媛,张守业,等.基于 CALIPSO 卫星数据的吕宋海峡云时空特征统计分析[J].海洋气象学报,2023,43(1): 101-106.

YU Bin, SUN Yuanyuan, ZHANG Shouye, et al. Statistical analysis on spatial and temporal characteristics of clouds in the Luzon Strait based on CALIPSO data[J]. Journal of Marine Meteorology, 2023, 43(1): 101-106. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599. 2023.01.009. (in Chinese)

## 基于 CALIPSO 卫星数据的吕宋海峡云时空特征统计分析

于斌<sup>1</sup>,孙媛媛<sup>1</sup>,张守业<sup>2</sup>,苏峰<sup>1</sup>,李鹏<sup>1</sup>

(1.91206 部队航空气象教研室,山东 青岛 266108;2.92689 部队气象台,广东 湛江 524000)

**摘要:** 基于 2006 年 6 月—2021 年 10 月期间 CALIPSO 星载激光雷达观测数据,对吕宋海峡低云和深对流等影响飞行的云时空分布特征进行统计学分析。结果表明,在南海季风、太阳辐射和季风槽的共同影响下:(1)低云覆盖率在 8 月左右最小,为 2.9%,在 1 月左右最大,为 67.4%;低云平均云底高在 7 月左右最低,为 756.1 m,在 1 月左右最高,为 1 259.4 m;低云平均厚度在 7 月最小,为 714.1 m,在 12 月最大,为 1 039.4 m。(2)深对流发生概率在 10 月左右最小,为 1.9%,12 月最大,为 18.7%;深对流顶高在 10 月最大,平均顶高为 16 056.2 m,在 4 月最小,平均顶高为 14 164.0 m。

**关键词:** 激光雷达;CALIPSO;云;吕宋海峡

**中图分类号:** P426.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2023)01-0101-06

**DOI:** 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.01.009

## Statistical analysis on spatial and temporal characteristics of clouds in the Luzon Strait based on CALIPSO data

YU Bin<sup>1</sup>, SUN Yuanyuan<sup>1</sup>, ZHANG Shouye<sup>2</sup>, SU Feng<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1</sup>

(1. Department of Aviation Meteorology, No.91206 Army of PLA, Qingdao 266108, China; 2. No.92689 Army of PLA Meteorological Observatory, Zhanjiang 524000, China)

**Abstract:** Based on the observation data of CALIPSO spaceborne lidar from June 2006 to October 2021, the spatio-temporal distribution characteristics of clouds affecting flight such as low clouds and deep convection in the Luzon Strait are statistically studied. Under the combined influence of monsoon, solar radiation change, and monsoon trough in the South China Sea, it is concluded as follows. (1) The low cloud coverage is the smallest (2.9%) around August and the largest (67.4%) around January; the average cloud base height of low clouds is the lowest (756.1 m) around July and the highest (1 259.4 m) around January; the average thickness of low clouds reaches its minimum (714.1 m) in July and maximum (1 039.4 m) in December. (2) The probability of deep convection is the smallest (1.9%) around October and the largest (18.7%) in December; the highest top height of deep convection is in October with the average value being 16 056.2 m, and the lowest is in April with the average value being 14 164.0 m.

**Keywords:** lidar; CALIPSO; cloud; the Luzon Strait

收稿日期:2022-03-15;修订日期:2022-07-18

基金项目:海军重点院校建设项目(202036)

通信作者简介:于斌,男,硕士,讲师,主要从事气象水文观测方面的研究,15953385968@163.com。

## 引言

云是影响飞机飞行的重要气象因素。海上低云带来危险天气和视程障碍,威胁飞行安全<sup>[1]</sup>。深对流与雷暴、冰雹等航空危险天气联系密切,是重要的天气指标。吕宋海峡是重要的战略通道,随着我国航母列编,在该区域的军事飞行活动越来越频繁,对航空气象保障要求也越来越高,其中云是影响飞行安全的重要气象因素。当前云的探测主要有有人工观测、地基器测和气象卫星云图识别等。海上云的探测主要有以下难点:人工观测是从云的底部进行肉眼观察,易受到眼睛、心理、天气等多因素干扰,同时海上很难进行定点、定时观测;地基(船载、空基)探测设备能够探测测站周围全天空云的特征,但存在探测范围有限、对环境要求高等情况<sup>[2]</sup>,且海面上陆基(岛礁)站点较为稀疏,单纯利用固定站点数据不能满足气象保障精度需要;航空报和船舶报数据量较小、代表性不高;地基(船载、空基)激光测云仪、微波雷达等在复杂天气条件下测云易受干扰;气象卫星云图能反演云顶高、云状和总云量,但由于云的宏观和微观不均匀性对云光学厚度的影响程度至今尚无准确结论,导致对于云体厚度、多层云云顶(底)高度的观测反演算法准确度不高<sup>[3]</sup>。

Hagihara 等<sup>[4]</sup>利用 CALIPSO (CloudSat-Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) 数据分析了全球云的分布特征, Yin 等<sup>[5]</sup>利用 CALIPSO-GOCCP (General Circulation Model Oriented Cloud Calipso Product) 数据对东亚云的三维结构进行研究,上述研究对本文云的统计分析具有启发作用。针对吕宋海峡云的探测存在上述问题,使用 2006 年 6 月—2021 年 10 月的 CALIPSO 卫星云和气溶胶二级数据产品,在 120.5°~122.7°E、18.6°~22°N 吕宋海峡范围这一重点战略区域内,采用数理统计方法,对低云和深对流的时空分布规律进行研究,以便更好地为本区域气象保障提供依据。研究区域如图 1 所示。

## 1 CALIPSO 卫星及所用数据

CALIPSO 卫星是 A-Train 系列极轨卫星编队星座的成员,于 2006 年发射,其最主要的设备是星载

对地探测激光雷达,能够探测气溶胶和云的物理特征及时空分布,揭示气溶胶和云在气候系统中的作用。该激光雷达开放下载的数据分为 Level1B、Level1.5、Level2、Level3 共 4 级。本文使用的是 Level2 VFM(V4-20)标准数据产品,可在美国航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的 CALIPSO 专题网站注册下载(<https://asdc.larc.nasa.gov/project/CALIPSO>)。

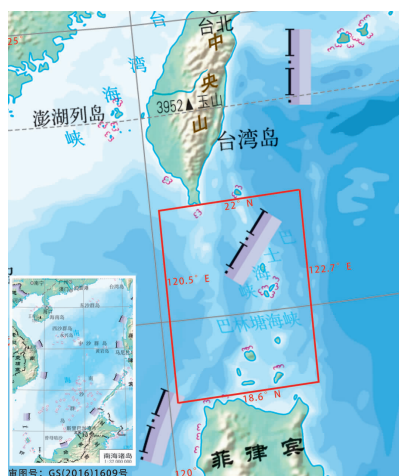


图 1 吕宋海峡示意图(红框区域代表研究区域)

Fig.1 The Luzon Strait (the red frame represents the research area)

CALIPSO 卫星的观测结果以 HDF5 格式存储,每日形成一个数据文件,其特征分类结果放在 Feature\_Classification\_Flags(FCF)数据块中,每个数据文件包含一个 FCF 数据块。FCF 数据块按照  $N \times 5515$  矩阵存储, $N$  为采样区域的个数。对于单个采样区域,海拔高度在 -0.5~8.2 km 范围内,垂直分辨率为 30 m;海拔高度在 8.2 km 以上,至 20.2 km 范围内,其垂直分辨率为 60 m;海拔高度在 20.2 km 以上,至 30.1 km 范围内,其垂直分辨率为 180 m。每个星下点上方有 290 个采样点。水平方向覆盖 15 个星下点,跨度为 5 km。FCF 数据中单个采样区域采样点存储序号、海拔高度与垂直分辨率的关系如图 2 所示,以第 8 个星下点经纬度作为 FCF 数据块中该采样区域的记录经纬度。CALIPSO 卫星的云分类参照国际卫星云气候学计划(International Satellite Cloud Climatology Project, ISCCP),ISCCP 是按照云顶气压进行分类的,其分类结果和传统意义上云的形态学分类有区别,低云指积云、层积云、层云,而深对流是高云<sup>[6]</sup>,本文的研究基于 ISCCP 云的分类。

## 2 研究方法

由于在 FCF 中随高度变化数据水平分辨率不同,因此在数据预处理中,需要将 FCF 数据块扩展为随高度变化水平分辨率不变,均为 333 m 的全高度数据。此时,每个星下点上方有 545 个探测数据点。图 2 为 FCF 数据块经转换后,各星下点对应的数据序号分布和分辨率示意图。

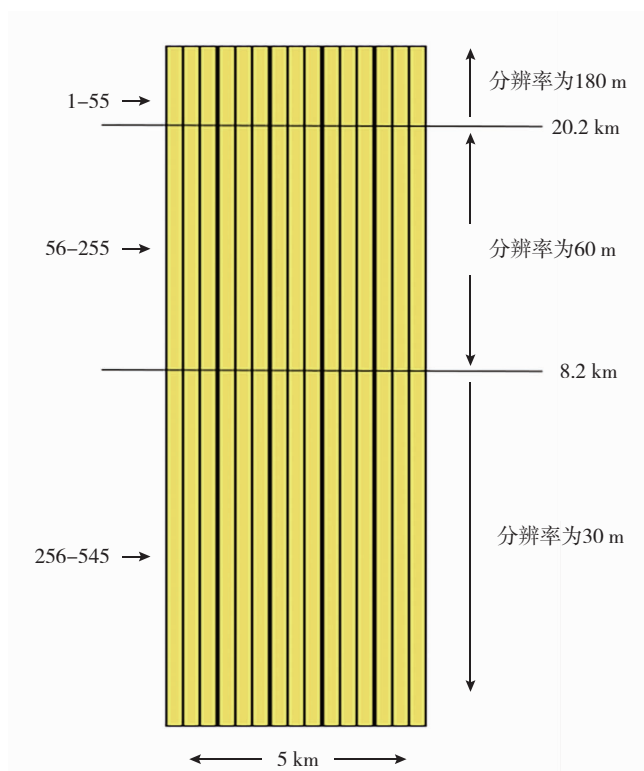


图 2 FCF 数据块变换后各星下点对应的数据序号分布和分辨率

Fig.2 Data sequence distribution and resolution corresponding to each sub-satellite point in the transformed FCF data block

### 2.1 基本算法框架

在文件中提取 FCF,判断是否满足时间、经纬度等数据选取条件,若满足,则进行特征提取和数理统计,且计入有数据天数  $x$ ;否则转入下一个文件进行处理。基本算法框图如图 3 所示。

### 2.2 特征提取与数理统计

从单点数据中,将对应位数转换为十进制,可以对每个星下点垂直高度上各采样点的类型进行分类<sup>[7]</sup>。根据图 2 采样点特征,可以计算各类云云底高、发展高度和厚度等信息。采用数理统计方法,可计算不同月份不同类型云的平均发生概率等数据。指定  $M$  月份云特征提取和数理统计流程如图 4 所示。

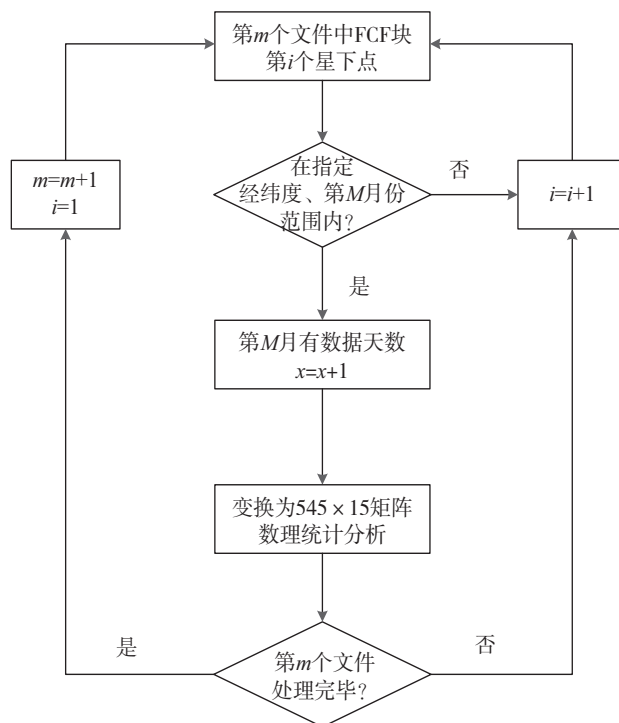


图 3 基本算法框架

Fig.3 Basic algorithm framework

指定月份  $M$ ,对符合条件的 FCF 变换后数据中第  $i$  个星下点进行判断,通过采样点类型分类,首先判断某类云是否有连续云点。由于 FCF 中采样点是自高向低进行的排列,因此最先出现的云点(在探测序列中序号  $k$ )为云顶,相应的云顶高为  $h_t$ (单位:m,下同),其计算为公式(1);最后出现的云点(序号  $m$ )为云底,相应的云底高为  $h_s$ ,亦可由计算公式(1)得到(此时  $h_s$  取代  $h_t$ ,  $m$  取代  $k$ );云厚  $\Delta h_d$  由云顶高和云底高计算得到,其计算为公式(2);有某类云体的有效天数  $x_m$  计数加 1;云体出现概率  $P$  由公式(3)计算。

$$h_t = \begin{cases} 30.1 - 0.18 \cdot k, & k \leq 55 \\ 20.2 - 0.06 \cdot k, & 56 \leq k \leq 255 \\ 8.2 - 0.03 \cdot k, & 256 \leq k \leq 545 \end{cases}, \quad (1)$$

$$\Delta h_d = h_t - h_s, \quad (2)$$

$$P = x_m / x. \quad (3)$$

由于在 ISCCP 云分类中,低云包含 3 类云体,此 3 类云体是影响飞行安全的重要危险天气之一<sup>[8]</sup>,因此在某个星下点数据中,当遇到多层不连续的低云云点时,考虑将各连续部分最高(低)高度的平均值作为云顶(底)高,并将各连续部分云顶高和云底高之差的平均值作为低云的发展厚度。

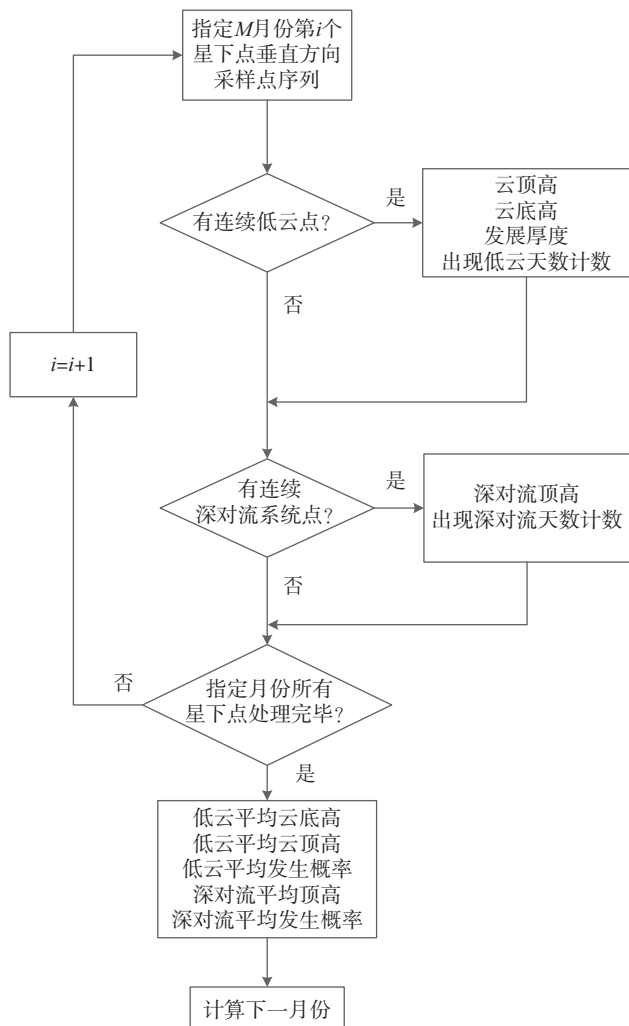


图4 指定月份相关数据数理统计流程图  
Fig.4 Flow chart of mathematical statistics of relevant data in specified month

### 3 结果与分析

#### 3.1 低云发生概率和发展高度

吕宋海峡属于副热带海洋性气候,具有明显的季风特点。季风影响显著,高温高湿,但海面温度常年保持一致,为 25~29℃,季节变化不大<sup>[9]</sup>。2006—2021 年低云发生概率逐月统计如图 5 所示。每年 10 月—次年 3 月,影响本海区的主要是东北季风,冷气团由大陆吹向海洋,在暖湿的海面上温差较大,利于暖湿气团抬升,形成低云,1 月,东北季风最为强盛,这与 1 月低云发生概率最大(67.4%)相吻合。而 4—9 月,受西南季风影响,虽然水汽很充足,但空中与洋面之间温差较小,不利于暖湿气团抬升,因此低云发生概率要比冬季小。夏季风于 5 月中旬

爆发,9 月东北季风开始出现<sup>[10]</sup>,这与 5—8 月低云发生概率持续降低,8 月发生概率最小(2.9%)相一致。赵倩<sup>[11]</sup>、齐琳琳等<sup>[12]</sup>的部分研究也支持本文的研究结果。

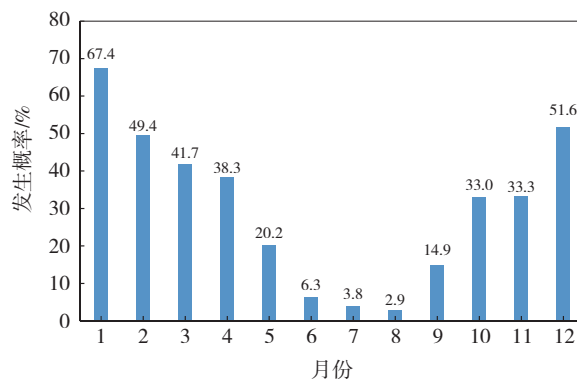


图5 2006—2021 年低云逐月发生概率  
Fig.5 Monthly average probability of low cloud from 2006 to 2021

虽然暖湿气团抬升条件较好,但是由于东北季风较为干冷,因此云的凝结高度较高,表现为平均云底高冬季较高。同时由于西南季风水汽充沛,虽然不利于暖湿气团抬升,但云的凝结高度较低,表现为平均云底高夏季较低。2006—2021 年低云云底高逐月平均值统计分布如图 6 所示,呈 U 字形分布,其分布特征与低云平均发生概率分布相一致,最高发生在 1 月,云底高达到 1 259.4 m;7 月,云底高最低,低至 756.1 m。

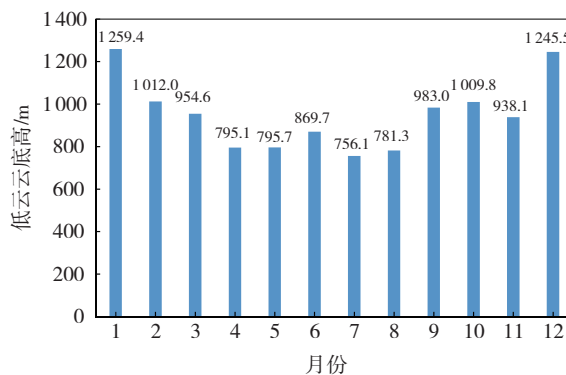


图6 2006—2021 年低云云底高逐月平均值  
Fig.6 Monthly average cloud base height of low cloud from 2006 to 2021

东北季风盛行时有利于暖湿气团抬升,但水汽相对贫乏;西南季风盛行时不利于暖湿气团抬升,但对流水汽充沛。上述原因差异使得全年低云平均厚

度基本保持一致,差别较小。2006—2021 年低云层厚度统计平均分布如图 7 所示,冬季发展较厚,超过 900 m,其中 12 月最厚,为 1 039.4 m,夏季和初秋(6—9 月)发展较薄,在 900 m 以下,其中 7 月发展最薄,为 714.1 m。

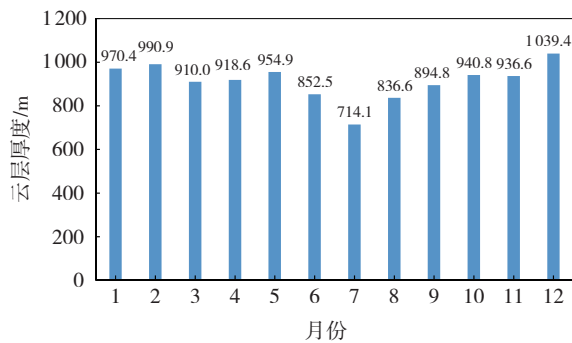


图 7 2006—2021 年低云层厚度逐月平均值  
Fig.7 Monthly average thickness of low cloud from 2006 to 2021

### 3.2 深对流发生概率和发展高度

深对流发生概率逐月平均值统计如图 8 所示,顶高逐月平均值统计如图 9 所示。分布规律整体上也与该海域季风变化规律相符合。每年 11 月—次年 3 月,该海区主要受东北季风影响,冷气团由大陆吹向海洋,在东北季风作用期间,吕宋海峡虽处于大气热力不稳定层结状态,东北季风使得下垫面较为干燥,有利于深对流的发生发展<sup>[13]</sup>,因此深对流发生概率相对较大(12 月最大,为 18.7%),但这个时间段内深对流发展高度整体相对较低。每年 4—10 月,在西南季风作用期间,该海域对流有效位能和垂直风速切变增强,有利于维持该海域对流活动的持续与加强<sup>[14]</sup>,但由于西南季风使得下垫面较为潮湿,影响深对流发生发展,从而导致深对流发生概率相对较小(10 月最低,为 1.9%),且由于夏秋季太阳辐射比冬季偏强,因此夏秋季深对流发展高度整体相对较高。4 月和 10 月处于南海季风转换期,因此在 4 月出现最低平均发展高度,为 14 164.0 m,10 月出现最高平均发展高度,为 16 056.2 m。8 月研究区域后方的南海季风槽强度最为活跃<sup>[15]</sup>,造成 8 月深对流发生概率偏高(8 月发生概率为 12.5%)。

## 4 小结

通过处理 CALIPSO L2 VFM 数据,对 2006 年 6 月—2021 年 10 月期间吕宋海峡低云的发生概率、

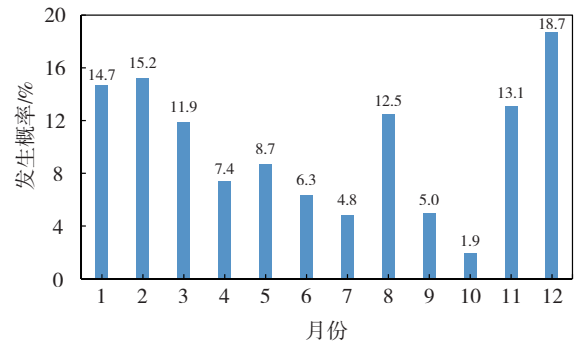


图 8 2006—2021 年深对流系统发生概率逐月平均值  
Fig.8 Monthly average probability of deep convection from 2006 to 2021

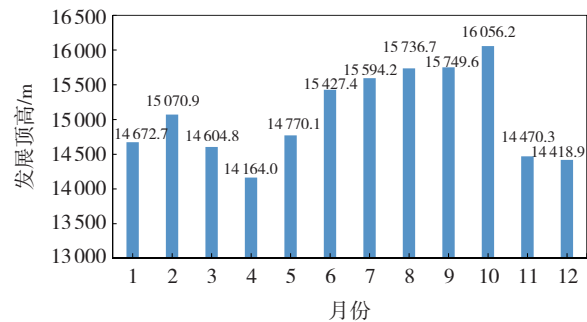


图 9 2006—2021 年深对流系统顶高逐月平均值  
Fig.9 Monthly average top height of deep convection from 2006 to 2021

发展厚度、云底高,以及深对流系统的发生概率、顶高等进行了统计,结果符合前人研究结果和季风变化规律,定性地验证了利用 CALIPSO 数据研究海上云特征的准确性。主要结论如下:

(1) 11 月—次年 3 月东北季风盛行时,吕宋海峡出现低云的概率较大,在 1 月左右最大,为 67.4%;云底高较高,在 1 月左右最高,为 1 259.4 m。深对流出现概率较大,在 12 月左右最大,为 18.7%;发展高度较低。

(2) 4—10 月西南季风盛行时,出现低云的概率较小,8 月左右最小,为 2.9%;云底高较低,7 月左右最低,为 756.1 m;深对流出现概率普遍较低,但由于南海季风槽、太阳辐射和季风的共同作用,8 月左右最大,为 12.5%,顶高普遍较高。在 4 月和 10 月季风转换期内,4 月出现深对流最低平均发展高度,为 14 164.0 m,10 月出现深对流最高平均发展高度,为 16 056.2 m。

(3) 低云云层厚度全年基本持平,平均在 800 m 左右,最低在 7 月,为 714.1 m,最高在 12 月,为

1 039.4 m。

由于 L2 数据经过了严格的质量控制,准确性较高<sup>[16]</sup>,因此本文的结果具有较高的可信度,对海上飞行气象保障有一定的指导作用。但南海季风槽如何影响研究区域深对流发生发展,后续还需要做进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 王青梅,张以谟,刘铁根,等.一种便携式激光测云仪的云底高度反演方法[J].强激光与粒子束,2005,17(9):1312-1316.
- [2] 胡树贞,马舒庆,陶法,等.地基双波段测云系统及其对比试验[J].应用气象学报,2012,23(4):441-450.
- [3] 胡丽琴.云的水平非均匀性对云特性参数反演结果的影响[D].北京:中国气象科学研究院,2005:1-103.
- [4] HAGIHARA Y, OKAMOTO H, YOSHIDA R. Development of a combined CloudSat-CALIPSO cloud mask to show global cloud distribution[J]. J Geophys Res: Atmos,2010,115(D4):D00H33.
- [5] YIN J F, WANG D H, XU H B, et al. An investigation into the three-dimensional cloud structure over East Asia from the CALIPSO-GOCCP Data[J]. Sci China Earth Sci,2015,58(12):2236-2248.
- [6] ISCCP. ISCCP definition of cloud types[EB/OL].[2022-03-15].<https://isccp.giss.nasa.gov/cloudtypes.html>.
- [7] NASA. Data user's guide[EB/OL].(2018-05-31)[2022-03-15].[https://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/calipso\\_users\\_guide/data\\_summaries/vfm/index\\_v420.php](https://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/calipso_users_guide/data_summaries/vfm/index_v420.php).
- [8] 裴昭昭,苏艳华,徐记亮.八大低云多发机场的云诊断算法应用初探[J].地球科学前沿,2022,12(4):456-464.
- [9] 刘金芳,邓冰,佟凯,等.巴士海峡水文要素特征分析[J].海洋预报,2001,18(2):22-29.
- [10] 姚玉娟.吕宋海峡黑潮季节性形变初探[D].厦门:厦门大学,2012:2.
- [11] 赵倩.基于卫星产品的重点海域云环境参数气候特征研究[D].南京:南京信息工程大学,2015:1-102.
- [12] 齐琳琳,赵倩,赵红亮,等.基于 ISCCP 卫星资料的南中国海云量特征分析[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2014,15(2):191-196.
- [13] 张璐,黄倩,张宏昇,等.干湿地表的湍流特征及其对深对流影响的大涡模拟[J].气象学报,2021,79(4):659-673.
- [14] 李香淑,郭学良,付丹红,等.南海季风爆发期间中尺度对流云带演变特征与持续性加强的机理研究[J].大气科学,2011,35(2):259-271.
- [15] 陈红,郭冬艳,吴俞,等.两类季风槽特征及海南岛的强降水机制[J].热带生物学报,2022,13(4):348-357.
- [16] 高星星,陈艳,张武.2006—2015年中国华北地区气溶胶的垂直分布特征[J].中国环境科学,2016,36(8):2241-2250.